

論文の内容の要旨

論文題目	摩擦型動力伝達装置に発生する不安定振動のメカニズムの解明と不安定振動を発生させないための安定化法
学位申請者	山 藤 勝 彦

CO₂排出量がゼロとなる量産型電気自動車は2009年に世界で初めて市場投入された。それから約10年後の2020年には「2050年カーボンニュートラル」が宣言され、内燃機関車の終焉も示された。これにより、2020年代において自動車市場では内燃機関車と電動駆動車は混在しており、今後数十年間にわたりこの状況は継続すると予測される。一方、自動車はビーチや泥濘路のような極低速で高負荷が求められる悪路や高速道路での高速走行まで、幅広い走行要求に応えなければならず、自動車の動力源が変わったとしても要求性能が下がることはない。そのため、内燃機関車、電動駆動車において市場要求を満足するためには駆動装置が必要不可欠となる。

この背景のもと、本博士論文では歯車に変わる次世代の駆動装置として優れた静粛性と高い伝達効率を特長とする減速機・有段変速機・無段変速機の3つの摩擦型動力伝達装置に注目する。3つの摩擦型動力伝達装置は、開発段階において不安定振動が発生しており、機械要素設計、制御系設計において手戻りが繰り返されている。そこで、本博士論文の目的は3つの摩擦型動力伝達装置における不安定振動のメカニズムを解明すると共に、実用面を考慮した不安定振動の安定法を示すことである。なお、本論文で取り扱う不安定振動の定義は、外部からの振動的な入力ではなく、本来振動的でない力が自身の特性によって振動となり、さらに非線形特性の影響を受け持続振動となる現象である。

自動車の振動に関する従来研究では解析ソフトとコンピュータの演算処理能力を活かした方法が主流の傾向にある。解析ソフトには物理モデルのブロックが用意されており、パラメータを入力するだけで容易にシミュレーションができる。その機能を活用し、従来研究ではドラムブレーキの単体の振動解析や、更に不安定振動問題を安定化させる主要パラメータを係数振りにて抽出している。しかし、解析ソフトとコンピュータの演算処理能力に頼った方法では、設計法が確立されていない。振動パターンが複数存在する解析対象では、感度パラメータが多数抽出されるため、分析は困難である。そこで、本博士論文では振動要因を捉

えた最小限のモデル化による検討を行う。

目的達成のために、3つの摩擦型動力伝達装置それぞれに対して、固有テーマと共通テーマが存在する。固有テーマは、基本構造の異なる3つの摩擦型動力伝達装置のそれぞれの不安定振動メカニズムの解明である。共通テーマは、不安定振動を発生させないための安定化法である。

減速機の押付け力発生機構は、くさび効果を用いることで外部エネルギーに頼ることなく必要押付け力を発生させるカムを採用している。この構造において、不安定振動のメカニズム解明の難しさは、不安定化の要素と不安定振動を発生させる要素が一致していない点にある。そこで、エネルギー法を用いて不安定振動の原因を分析する。安定化法の導出では、実験と周波数応答を一致させたモデルでは複雑化する問題が発生する。そこで、振動要因を捉えた最小限のモデル化を行い、ラウス・フルビッツの安定判別法を適用する。

有段変速機では変速中に不安定振動が発生する。変速は、変速用モータにて各段のローラに切り替え、ローラの表面を滑らせながら動力を伝達することで実現する。不安定振動は変速中のローラ表面の摩擦係数－滑り速度特性 ($\mu - V$ 特性) が負勾配となることが要因である。本博士論文では実用面を考慮し、コスト・重量を悪化させない方策として変速用モータの制御にて抑制する。課題は強い非線形特性を有する $\mu - V$ 特性のモデル化である。これに対して、 $\mu - V$ 特性を変速機の周波数特性上の変動要素として扱った最小限のモデル化を行う。さらに、ジャダー抑制に用いる変速用モータは、ジャダー周波数よりカットオフ周波数の低い。この問題に対して、 H_{∞} 制御理論を適用した制御系設計法を提案する。

無段変速機では、単体では安定な圧力弁を油圧回路に組み込むことで不安定振動が発生する。原因が圧力弁のクーロン摩擦力であることは経験的に知られている。振動のメカニズム解明の難しさは、油圧回路の中で圧力弁のクーロン摩擦力により生じる遅れと組み合わせることで不安定化する別の遅れ要素を特定することにある。この問題に対して、非線形シミュレーションを用いて仮説検証し、実機実験時の振る舞いと一致する遅れ要素を特定する。安定化法では、不連続性をもつクーロン摩擦力を考慮した最小限のモデル化が課題となる。クーロン摩擦力を時間軸上で線形一次近似すると不安定要素要因は消去される。またオイラー法による離散時間表現に近似すると、解析計算は複雑化する。本博士論文では、周波数領域での線形一次近似法である記述関数法を適用した安定化法を示す。

以上を論ずることで、実用面を考量し他の性能を悪化させることのない、安価で再現性の高い安定化法を提案すると共に、モデルベース開発の重要性を示す。更に、振動工学、制御工学、機械要素設計、自動車における駆動系において貢献を成す。振動工学に対しては、新たな不安定振動の事例と不安定振動問題の単一部品からシステム系への拡張を示す。制御工学に対しては、不安定振動を抑えるためには位相を捉えたモデル化が重要であることを示す。機械要素設計に対しては、制御工学における安定理論に基づいた新しい機械要素設計法を示す。自動車の駆動系に対しては、摩擦型動力伝達装置の性能向上並びに研究段階にある新たな摩擦伝達装置の実用化に向けた基礎設計法を提案する。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 山藤 勝彦

審査委員主査 澤田 賢治

委員 田中 一男

委員 田中 基康

委員 金子 修

委員 小木曾 公尚

(*自筆署名の場合に限り、押印省略可)

提出された論文は制御工学における安定理論に基づき、摩擦型動力伝達装置に適した実用面を考慮した安価で有効性の高い機械要素設計法及び制御系設計法について論じるものである。減速機・有段変速機・無段変速機に顕在化しているフラッタ型の不安定振動に対して振動を抑制させるための基礎設計法を提案している。3つの伝達装置に対して安定化設計を実現する上で必要以上に複雑とならないモデルを構築し、線形システムの安定条件、スモールゲイン定理、記述関数法を適用することで各装置に適した基礎設計法を構築している。全ての提案設計法の有効性は非線形シミュレーション及び実機実験にて示されている。得られた成果は振動工学、制御工学、機械要素設計、自動車における駆動系の開発に貢献するものとなっている。

本論文の構成は以下の 6 章となっている。

第 1 章は本研究の背景と目的を論じ、摩擦型動力伝達装置に関する研究課題を示している。先行研究における機械設計的な解決やCAD (Computer Aided Design) を紹介し、本研究の立ち位置、貢献について明らかにしている。

第 2 章は摩擦型動力伝達装置の安定化法に導出に用いた制御理論の示している。弾性流体潤滑 (EHL) の基礎理論、トランクションドライブの摩擦特性、クーロン摩擦力、ナイキスト安定、スモールゲイン定理、記述関数法について説明している。

第 3 章はくさび効果を用いた摩擦型減速機の不安定振動のメカニズムを解明している。更に、その不安定振動を発生させないための設計法を論じている。具体的には、不安定化要素と不安定振動要素が一致しない問題をエネルギー法により解析している。エネルギー法による解析では、実機の振る舞いから2つの仮説を立て、モデルと非線形シミュレーションの結果により、振動要素を特定している。安定化設計法の導出では、実験と周波数応答を一致させたモデルでは複雑化する問題を解決している。振動要因を捉えたモデル化方法を提案し、ラウス・フルビッツの安定判別法に基づく安定化設計方法を与えている。得られた結果の正当性は、

実機のパラメータを反映させた非線形シミュレーションと実機実験において検証されている。

第 4 章は摩擦型有段変速機の変速時における $\mu - V$ 負勾配に起因した不安定振動の制御による振動抑制方法を論じている。 $\mu - V$ 特性の非線形特性は高次の多項式によりモデル化できるが、その際に得られるモデルを自動車の開発工程で利用することが再現性の意味で難しい。ここでの再現性とは、開発工程に関わるエンジニアがそのモデルから共通の現象を理解できる事、そのモデルを利用して一般的な制御系設計によって制御器を構築できることである。 $\mu - V$ 特性を変速機の周波数特性上の変動要素として扱い、変速性能を満たすノミナルモデルと重み関数を設定することで、設計工程において再現性のあるモデル化方法を与えている。また、ジャダー抑制に用いる変速用モータのカットオフ周波数がジャダー周波数より低いという問題を、 H_{∞} 制御理論から解決している。同時に、変速用モータのサーボ制御方法もモデルマッチングの観点から検討している。自動車業界において利用が一般的な MATLAB/Simulink 内の H_{∞} 制御手法で設計するための性能指針を明らかにしており、自動車の開発工程における再現性を担保している。得られた問題は開発工程で用いられる台上実験でも検証されている。

第 5 章は摩擦型無段変速機の変速用油圧アクチュエータにおいて、経験的に知られているスプールに作用するクーロン摩擦力による不安定振動のメカニズムを解明している。さらに、その不安定振動を発生させないための安定化設計法を論じている。不連続性をもつクーロン摩擦力による不安定振動をモデル化するために、クーロン摩擦力のヒステリシス近似とヒステリシスの記述関数化を導入している。これにより、クーロン摩擦力による不安定振動を周波数領域で評価できるようになり、振動解析条件をナイキスト安定の観点から与える事が出来ている。得られた結果の正当性は、実機のパラメータを反映させた非線形シミュレーションと実機実験において検証されている。

第 6 章は各章で得られた結果のまとめとなる。本論文の制御工学に基づく機械要素設計と自動車の駆動開発系に対する成果と今後の展望についてまとめられている。

本研究では、変速器の設計開発の現場で扱われてきた経験則を振動工学と制御工学の観点から定量化したことに価値がある。また、変速器モデルから振動解析条件や設計条件を定式化する際、モデル低次元化や線形化部分における振動現象再現のための不変性の重要性を明らかにし、学術分野に対する貢献もある。機械要素技術と制御工学の融合、4力学と制御の融合など、機械工学分野における今後の研究への発展も期待される。

以上、本論文はその新規性、独創性および有用性が高く評価される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。